

하천제방 안정성(지반공학적 측면)



김진만 ▶▶
한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원
jmkim@kict.re.kr

1. 머리말

최근 국내 하천제방은 노후화 및 이상홍수로 인하여 치수구조물로서 안정성이 떨어지고, 홍수 시 제방 붕괴로 인한 인명 및 재산피해가 가중되어 왔었다. 국내 제방붕괴 유형은 1987년~2003년까지의 통계 자료에 의하면 조사건수 758건 중 월류 300건(39.6%), 침식 295건(38.9%), 제체 불안정 87건(11.5%), 구조물에 의한 파괴 76건(10.0%) 등인 것으로 보고하고 있다(한국건설기술연구원, 2004).

하천제방 붕괴 원인은 분석 결과를 고찰하면 수공학적 원인 뿐 만 아니라 지반공학적 원인과 직·간접적으로 관련되어 있음을 알 수 있다. 예로써 제체 불안정에 의한 파괴는 전통적으로 지반공학분야인 제체 및 기초지반의 침하, 침투, 사면안정 등과 관련된 설계 및 시공, 유지관리 등의 문제점들이 복합되어 발생된다.

이러한 관점에서 하천설계기준(2005)은 치수 구조물로서 제방분야 설계기준 개정과 관련하여 수공학 및 지반공학의 관련 전문가가 공동 대안을 제시하였다는 점에서 큰 의의가 있다. 2005년도판 하천설계기준 개정 중 지반공학분야와 관련된 중요 내용은 다음과 같다.

- 입도분포특성, 투수특성 등을 고려한 제방재료 선정 기준 강화

- 하상도 활용의 제한적 권장
- 제방다짐관리 기준 강화 :
 - 제방 구간 : 상대다짐도 90%로 상향 조정
 - 구조물 구간 : 상대다짐도 95%로 상향 조정
- 1:3 비탈면 경사 완화에 의한 제방안정성, 친수성, 장비 접근성 개선
- 배수통문 주변 제방재료 선정, 다짐규정 강화, 말뚝사용의 예외적 제한 등
- 파이핑 방지 관련 설계 및 대책공법의 보완

그럼에도 불구하고 국내 하천제방 관련 설계기준은 안정성 및 합리성에 있어서 미국, 일본, 유럽 등에 비해 매우 미흡한 수준으로 지속적인 관련 전문가들의 연구·보완이 요구된다.

한편, 하천제방의 설계는 대상 현장의 복잡한 수리·수문학 및 지반공학적 특성을 복합적으로 고려하여야 한다. 이때 지반공학분야는 하천제방과 관련하여 주로 현장여건을 고려한 합리적 제방재료 선정, 지반조사 및 지반정수의 도출, 홍수 및 강우특성을 고려한 제체 활동에 대한 안정, 강우 시 침윤면의 형성·발달에 따른 제체 누수에 대한 안정, 기초지반의 침투압 상승에 따른 파이핑에 대한 안정 및 방지대책, 배수통문과 같은 제방 횡단 구조물에 의한 제체 안정 및 평가·유지관리 등과 연계되어 맡은 바 역할을 수행한다.

최근 외국의 제방설계는 기존 제방 설계의 문제점을 보완하고자 일반 구조물과 같이 수리학적 혹은 지반공학적 안정성을 바탕으로 외력과 내력의 비교를 기본으로 하는 설계 방식으로의 전환을 추진하고 있다. 예로써 제방설계에 요구되는 수치해석은 기존의 정상침투/포화 해석에서 미국, 유럽 등 정상침투/포

화·불포화 해석으로, 일본의 경우 비정상침투/포화·불포화 해석으로 전환되는 추세에 있다. 이러한 해석 모델은 현장의 포화조건과 가까운 모델을 선정함으로써 해석결과의 정확성을 유도하려는 것이다.

이때 포화·불포화 모델은 지반의 포화·불포화 조건과 관련된 지반정수 값을 제시하여야 하나, 현재 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 미미한 실정에 있다. 이렇듯 하천제방은 표준단면도로 설계가 필요 없는 구조물이 아니라 교량이나 터널과 같이 경제성 및 안전성을 고려하여 더욱 더 숙련된 엔지니어의 경험 이 요구되는 설계 분야이다.

본 고에서는 지반공학과 관련된 하상도 합리적 활용방안, 합리적인 수치해석 및 설계 방안, 배수통문 붕괴 유형 및 개선방안 등과 관련된 문헌을 분석·정리하여 하천제방분야의 지반공학적 현황 및 문제점, 지반공학과 수공학분야의 공동 협력 필요성을 재인식 시키고자 하였다.

2. 제방 안정성 제고를 지반공학적 대안

2.1 하상도 활용의 합리적 방안

낙동강 수계 하상도 발생 특성은 전체적으로 하천 본류를 따라 강사인 입경이 균등한 모래(SP)가 발생되며 또한, 하천 본류와 지천의 합류부, 자연습지, 하구언 등과 같이 물의 저류로 인한 퇴적특성이 우세한 지역에서 불연속적으로 점토나 실트계열의 세립한 하상도가 발생하는 경향을 보인다.

표 1에서는 낙동강 수계의 안동댐 하류~낙동강하구언 구간 총 22개소 하상도 조사구간 중 4개소 하상도 및 제방재료에 대한 입도분포시험 및 통류분류법에 의한 흙 분류 결과를 보여준다. 한편, 그림 1에서는 사용된 하상도 채취 위치 및 현장 전경을 보여준다.

입도분석 결과에서 보듯이 4개소 낙동강 제방은 하상도와 유사한 공학적 특성을 보여 하상도를 이용하여 축조되었음을 알 수 있다.

표 1. 낙동강 수계 하상도 및 제방재료의 입도특성

구분	하상 재료	제방 재료
입경 범위	0.074~25.4mm	0.074~19.1mm
$C_{u,avg}$	3.2	5.2
$C_{g,avg}$	1.3	1.0
통류분류	SP	SP

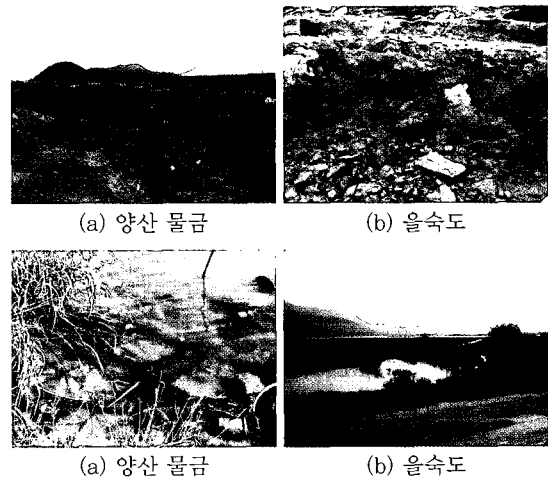


그림 1. 하상도 채취 위치 및 현장 전경

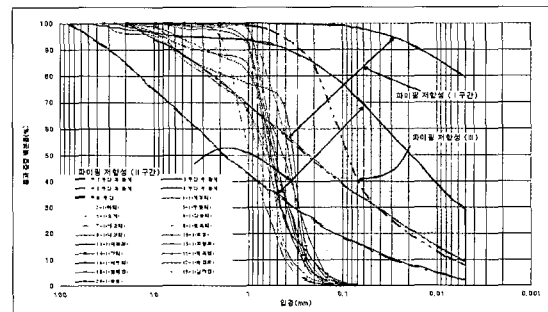


그림 2. NAVFAC 기준에 따른 국내 하상재료의 제체누수에 대한 저항성 분석

국내 발생 강모래 하상토는 흙의 내부마찰각이 34° 이상으로서 하천설계기준 상 비탈면 경사 1 : 3에 의한 자연안식각 18.4° 보다 크므로써 활동과 같은 강도측면의 안정성이 확보된 것으로 나타났으며, 특히 전단강도특성만을 비교해 볼 때 양질의 제방재료인 화강풍화토 보다 우수한 것으로 평가된다.

그림 2에서 보듯이 국내 발생 하상토는 입경이 균등한 모래(SP)로 평가되어, 하천설계기준 및 NAVFAC

매뉴얼 상 부적절한 제방재료로서 하상토 활용에 따른 안정대책을 반드시 수립하여야 한다.

한편, 하상토 활용에 따른 안정대책공법은 크게 합수비 조정 기법(공기건조공법, 트랜치굴착공법, 야적공법, 성토탈수공법, 강제건조공법), 입도조정기법(입도조정공법), 안정처리기법(시멘트안정처리공법, 석회안정처리공법)등 있다. 이중 많이 쓰이는 공법은 입도조정공법과 시멘트 안정처리공법이다.

일반적으로 하상토 활용기법은 입도조정기공법의 경우 혼합토로서 화강풍화토 혼합과 같이 강모래와 같은 조립토에서, 시멘트 안정처리공법의 경우 소성이 작은 실트질(ML)이나 소성이 작은 점토(CL) 등과 같은 세립토에서 투수계수 저하 및 전단강도 증진 등을 목적으로 사용된다.

하상토(SP)에 화강풍화토를 혼합한 혼합토의 투수계수는 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 1×10^{-2} 에서 1×10^{-5} cm/sec 정도로 작아지는 경향을 보인다. 하상토(SP)와 같은 강모래를 제방재료로 활용할 경우에는 현장배합시험에 의한 투수특성 평가를 통한 최소 혼합률을 결정하여 사용하여야 한다.

국내 하천설계기준(2005) 및 하천공사표준시방서(1999)에는 하상토 활용과 관련된 세부시행지침이 없어 현장토 활용에 장애 요인으로 나타나고 있는 실정에 있다.

2.2 합리적인 수치해석 및 설계정수 선정 방안

하천제방 및 배수통문의 침투해석은 설정된 설계외력 및 제방 모델을 대상으로 수행하며, 해석결과로부터 안정성 조사 항목별 수치를 산출하여 안정성을 평가하기 때문에 하천제방 안정성 평가에 있어서 중요한 부분을 차지한다.

본 고에서는 침투 및 활동해석에 영향을 미치는 인자 중 메쉬의 크기, 고수위 지속시간, 시간 변화에 따른 수위 조건, 토질설계정수의 선정, 사면 안전을 적용 등등 현장 설계의 문제점 도출 및 합리적 해결방안을 제시하고자 한다.

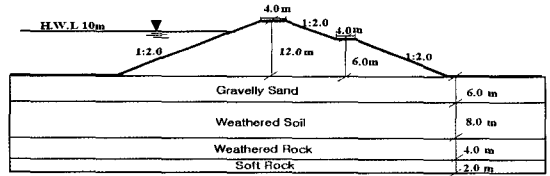


그림 3. 침투해석에 사용된 단면

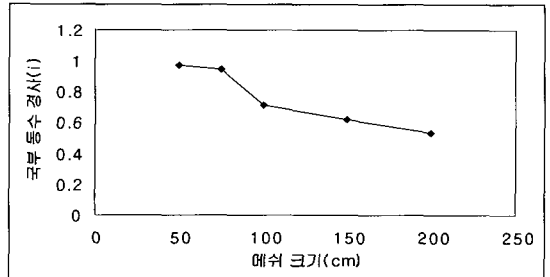


그림 4. 메쉬 크기에 따른 해석 결과

한편, 침투해석은 그림 3과 같은 해석단면에 대해 약 4,000여 개의 치밀한 4절점 평면요소로 이루어진 유한요소망을 이용하여, 스위스의 ZACE 사에서 개발된 지반해석 전용 프로그램인 Z-SOIL 프로그램을 사용하여 수행하였다(한국건설기술연구원, 2004).

(1) 메쉬 크기의 영향

그림 4는 메쉬 크기에 따른 침투해석 결과를 보여준다. 국부동수경사(i)는 그림 4에서 보듯이 메쉬 크기가 작아질 경우 증가하며, 제체 높이(12m)의 약 1/10인 100cm에서 75cm 사이에 급격히 증가하고, 제체 높이의 약 1/20 정도인 메쉬 크기 0.5m~75cm에서 변화폭이 감소하는 것으로 나타났다.

국내 현장 설계자들은 메쉬크기에 대한 영향을 고려하지 않고 임의의 메쉬분할을 함으로서 침투안정성을 과소 평가하는 경향이 있다. 따라서 국내 수치해석은 침투해석 시 메쉬 크기를 제체높이의 1/10 이하, 대략 0.5m 이하로 설정하여야 한다.

(2) 정상수위조건 시 고수위 지속시간의 영향

그림 5는 설계실무에서 수위파형에 대한 정보가 없을 경우 댐 설계와 동일한 방법으로 적용되는 정상

수위조건을 보여준다(땀설계기준, 2001). 본 수위파형은 정상수위지속시간을 무한히 하여 설계하면 과다 설계값이 제시되는 반면에 지속시간을 조정할 경우 과소 설계를 유발할 수 있다.

그림 6에서 보듯이 정상수위조건에 의한 고수위 지속시간은 제체내 침윤면 형상 및 크기가 고려 시간대 별로 변화됨으로 합리적 지속시간을 고려하여야

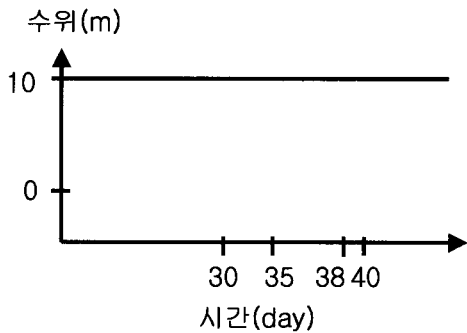


그림 5. 정상수위조건

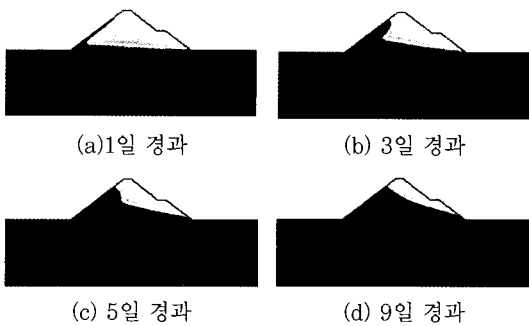


그림 6. 고수위지속시간에 따른 침투해석 결과

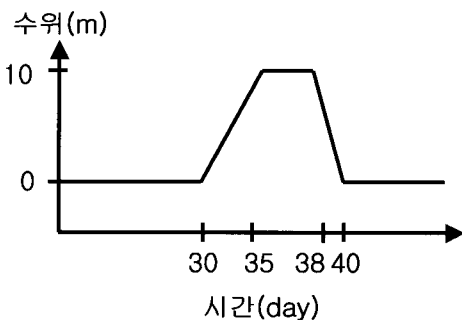


그림 7. 비정상수위조건

한다. 분석결과, 침윤선은 입경이 균등한 모래(SP)일 경우 9일 이상, 투수성이 작은 점토질 모래(SC)인 경우 20일 이상인 것으로 나타났다.

(3) 수위파형을 고려한 설계의 영향

그림 7은 현장 수위관측 데이터를 이용하여 비정상수위조건을 보여준다. 본 수위파형은 적절한 산정이 이루어졌을 경우 경제적 설계를 유도할 수 있다. 반면에 본 수위파형을 고려한 설계는 홍수파형 뿐만 아니라 강우특성을 반드시 함께 고려하여 반영하여야 한다.

하천설계기준은 이러한 수위설계파형에 대한 합리적 대안을 제시하지 못하고 있다. 일본에서는 집중호우와 같은 강우특성을 고려하여 시간에 따라 수위가 변화하는 수위파형 모델을 사용하는 비정상 수위 조건의 비정상 침투 해석을 적용하여 경제적 설계를 유도하고 있다(日本建設省, 2000).

(4) 제방 설계시 도로 관련 토질설계정수의 준용

하천설계기준은 표 2에서 보듯이 하천제방 다짐과 관련하여 2002년판의 경우 상대다짐도 85%로, 2005년판의 경우 90%로 실시하도록 되어있다.

하천설계기준(2002) 상대다짐도 85%는 다짐장비를 사용하지 않는 관제로 다짐된 제체의 역학적 불안정성, 다짐관리의 취약성, 구조물 주변 다짐관리기준 및 다짐장비선정의 부재 등의 문제점이 있어 보완되었다.

한편, 일본 하천설계기준(2000)은 상대다짐도를 85%에서 90%로 강화시키면 흙의 투수특성이 조립토의 경우 $1 \times 10^{-1} \text{cm/s}$, 세립토의 경우 $0.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 등으로 제체 침투저항성 강화되고, 흙의 전단강도특성의 경우 세립토에서 점착력 1t/m^2 , 조립토에서 내부마찰각이 10° 정도를 개선시키는 효과가 있는 것으로 보고하고 있다.

지금까지 국내 하천제방의 설계는 설계 시 토질정수의 채택에서 도로설계기준을 많이 준용하였다. 도로설계기준은 기본적으로 다짐도가 노체의 경우 90%, 노상의 경우 95%로 관리하여 일본 하천설계기

표 2. 국내 및 일본 다짐관련 기준

기준	항목	상대 다짐도	다짐 높이
하천설계기준(2002)		85%	30cm
하천설계기준(2005)		90%(구조물 95%)	20cm~30cm
일본 하천설계기준		90% 이상	30cm

표 3. 제체 상태에 따른 안전율

제체 상태	간극수압상태	안전율
인장균열 불고려 시	간극수압 고려	2.0 이상
	간극수압 불고려	1.4 이상
인장균열 불고려 시	간극수압 고려	1.8 이상
	간극수압 불고려	1.3 이상

준이 제기된 설계상의 문제점, 즉 다짐도 변화에 따른 토질설계정수 변화를 고려하지 못하는 문제점이 있다. 그러나 하천설계기준(2005)은 다짐기준을 상향 조정함으로써 도로설계정수를 사용할 수 있는 기틀을 제시하였다.

(5) 사면해석 시 기준 안전율을 적용 오류

표 3은 하천설계기준(2005)상의 제체 상태에 따른 사면 안전율을 보여준다. 표 3에서 보듯이 사면활동 해석은 침투에 따른 간극수압 변화, 제체내 인장균열 발생유·무 등을 고려하도록 되어 있다. 하천설계기준(2005)은 사면활동 해석시 적정의 최소 안전율로서 인장균열 및 간극수압을 고려하여 1.3을 제안하고 있으나 현장설계에서는 인장균열을 고려하지 않으면서도 1.3을 적용하는 사례들이 종종 있다.

인장균열은 제체내 독마루부에 균열이 발생되어 강우 시 균열면에 물이 포화되면서 발생되어 사면안정을 저해하는 요인이다.

따라서 설계시 제체 침투해석만을 고려했다면, 사면활동에 관한 안전율은 반드시 1.4를 적용해야 한다.

2.2 배수통문 붕괴유형 및 개선 방안

하천제방에 설치된 배수통문은 말뚝기초 사용에 따른 배수통문 주변 공동 발생, 배수통문 설치에 따

른 제방 폭 감소, 배수통문 구조물 주변 다짐 불량에 따른 누수 위험성 등에 의한 하천제방 안정성을 저하시키는 구조물로 여겨진다.

국내 배수통문 관련 붕괴유형 및 개선방안은 다음과 같다.

(1) 말뚝기초에 의한 통문 하부 공동 및 유로 발생

본 붕괴유형은 그림 8과 같이 말뚝으로 기초 처리된 배수통문에서 많이 발생된다. 붕괴 원인은 신설 및 보축 또는 장기연약지반침하 등에 따른 제체 토사 하중으로 인한 하부 연약지반에 침하가 발생하여 홍수 시 파이핑에 의한 암거저부의 공동 발생이다. 대표적인 붕괴 제방은 백산제, 광암제, 봉산제 등이 있다.

본 파괴 유형에 대한 지반공학적 개선방안은 배수통문의 종단 설계 의무화, 약액주입공법 사용에 따른 말뚝 사용 억제, 말뚝사용 시 엄격한 설계 및 시공관리 등이다.

(2) 보축에 따른 배수암거 붕괴

본 사례는 정밀 안전진단 없이 기존 구조물 위에 보축 설계함으로써 기존 배수암거의 노후화 및 성토



그림 8. 말뚝기초에 의한 붕괴 사례

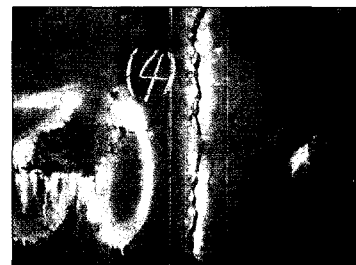


그림 9. 보축에 의한 횡방향 균열 사례

하중 변화에 따른 붕괴 유형 이다. 이때 배수통문은 그림 9에서 보듯이 횡균열 발생과 상재하중의 증가에 따른 PC 말뚝기초의 지지력 부족으로 지반침하가 동시에 발생된다.

본 파괴 유형에 대한 개선방안은 선형 안전진단 및 배수통문의 중단 설계 의무화 등이다.

(3) 신축이음부에 의한 압거의 파괴

신축이음부는 온도응력변화에 따른 콘크리트 균열 및 수축에 대한 유동성 확보와 물의 유입 방지(지수판)를 목적으로 설치된다. 신축이음부는 그림 10과 같이 제체 및 기초 변형에 따른 변형이 허용변형(20mm) 보다 크게 발생할 경우 손상된다.

손상된 신축이음부는 특히 강제 배수시 내수 및 외수에 의한 토사 유실 경로가 되어 제체 함몰 및 또는 공동을 발생시킨다.

본 파괴 유형에 대한 개선방안은 그림 11과 같은 가요성 재료에 의한 신축이음부 강화, 배수통문 중단 설계 시 지중온도를 고려한 신축이음부의 배제, 강제 배수/자연배수의 이원화 등이다.



그림 10. 신축 이음부 균열 사례

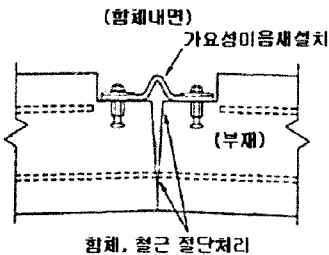


그림 11. 가요성 재료에 신축이음 사례



그림 12. 말뚝 속채움 모래의 포설 사례



그림 13. 현행 배수배수펌프장 단면도

(4) 말뚝 항타용 모래채움재에 따른 압거의 파괴

배수통문 시공은 연약지반 상 지하수위 또는 관측수위 부분에서 시공이 이루어지며, 이때 말뚝 항타를 위한 항타기(약 20ton)와 같은 중장비를 동원한다. 또한, 말뚝시공은 시공특성상 장비 주행성 확보를 위한 지반보강용 사석 포설과 말뚝시공 완료의 강관 말뚝 내 빈 공동을 속채움 하기 위한 모래 채움 과정을 포함하고 있다. 이러한 사석포설 및 모래 속채움은 그림 12에서 보듯이 시공완료 후 잘 처리하지 않을 경우 포설된 사석 및 모래층을 통한 누수가 발생되어 제방 붕괴를 야기 시킨다. 대표적인 사례로는 백산제, 광암제 사례를 들 수 있다.

본 파괴 유형에 대한 개선방안은 배수통문 주변 성토재료 선정 및 다짐 규정 등을 꼽을 수 있다.

(5) 배수펌프진동 및 토출수조 구조에 의한 통문 하부 공동 및 유로 발생

본 붕괴유형은 말뚝으로 기초 처리된 배수통문에 서 많이 발생하는 경우로서, 그림 13과 같이 현장 시공 시 유입된 모래나 다짐이 안 된 세립토(실트, 점

토)가 제체 내 매설된 토출수조와 연결된 배수펌프 진동에 의해 동다짐 되어 통문 하부에 공동이 형성되면서 발생된다.

대표적인 붕괴 사례는 광암제 등을 들 수 있으며, 개선방안으로는 1)펌프/토출수조 연결부의 이격이나 흡진재 설치 의무화, 2)토출수조의 제체 밖으로의 설치 위치 변경 등이 있다.

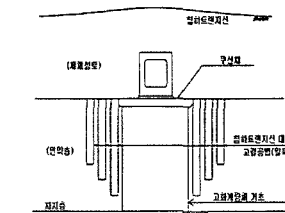
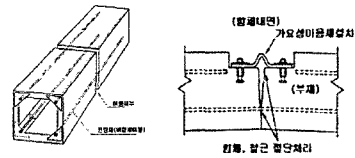
(6) 국내 배수통문 개선방안

위에서 언급된 붕괴 유형별 개선방안으로는 1) 배수통문 주변 성토재료 선정 및 다짐 규정, 2)배수통문의 종단 설계 의무화, 3) 말뚝 사용 억제, 4) 보축 시 기존 배수통문의 안전진단 수행, 5) 가요성 재료에 의한 신축이음부 강화, 6) 자연배수/강제배수의 이원화, 7) 펌프/토출수조 연결부의 이격이나 흡진재 설치 의무화, 8) 토출수조의 제체 밖으로의 설치 위치 변경 등을 들 수 있다.

특히 현행 하천설계기준(2005)은 배수통문 주변 성토재료 선정 및 다짐 규정, 말뚝 사용 억제, 토출수조의 제체 밖으로의 설치 위치 변경 등의 경우 개정을 통하여 반영하고 있다. 향후 보완되지 않은 개선방안은 전문가들의 의견 수렴을 거쳐 하천설계기준에 반영되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 일본 및 네덜란드 등지에서는 신개념 통문을 제안하여 말뚝 처리된 연약지반상 배수통문의 내부토체 및 외부토체의 상대적 침하에 따른 공동 발생을 억제하려는 방안들이 강구되고 있다. 그 대표적인 사례는 그림 14에서 보듯이 유구조/유지지 배수통문, 마이크로터널링 기법을 이용한 배수통문, 제체 비탈면 횡단 배수통문 등을 들 수 있다(國土開發 技術研究 Center,1998).

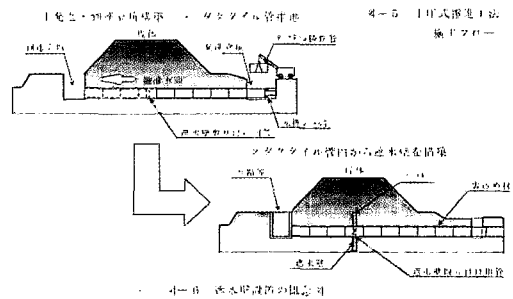
그러나 제안된 신개념 배수통문은 유구조/유지지 배수통문 및 마이크로터널링 기법을 이용한 배수통문의 경우 경제성 및 국내 관련 제작 기술의 미비로 인한 도입 및 시행의 어려움 등이 있는 반면에 제체 비탈면 횡단 배수통문의 경우 국내 및 외국의 적용 사례도 있어 적용의 어려움이 없어 향후 심화연구를 통



(a) 유구조/유지지 배수통문



(b) 제체 비탈면 횡단 배수통문



(c) 마이크로터널링 기법에 의한 배수통문

그림 14. 신개념 배수통문 개요도

한 적용이 기대된다.

3. 맺음말

최근 지반공학분야와 관련된 제방붕괴는 광암제, 백산제, 가현제 등 전제 제방 피해의 20.5%에 해당하는 큰 문제 요인으로 대두되고 있다. 특히 배수통문 분야는 하천제방과 관련된 수자원분야, 주변지반의 파이핑, 다짐, 침하와 관련된 지반분야, 배수박스

설계와 관련된 구조분야 등 토목 전반에 관련된 요소 기술의 집합적 성격을 가지고 있다. 국내 배수통문 관련 피해는 기술적 측면에서 이러한 토목기술의 모든 분야가 관련되어 있으면서도 구조물이 단순하다는 이유로, 관련 분야에 대한 공동연구가 추진되지 않아 붕괴에 따른 피해가 다소 확대되지 않았나 하는 안타까움이 있다.

일본은 이미 제방 및 배수통문과 관련하여 시설물 개요, 위치, 공학적 특성, 피해이력, 토질특성 등의 데이터 베이스를 정립해 놓은 실정에 있으며 또한, 배수통문 관련 최대 취약점인 배수통문 주변 공동을 탐지할 수 있는 연통시스템과 지반침하를 고려한 유구조/유지 배수통문 시스템을 제안해 놓은 실정에 있다.

국내에서도 이러한 연구추세와 관련하여 연통시스템과 같은 탐사기술의 개발, 제방관련 국가 시설물 관리를 위한 D/B 구축, 연약지반상 합리적 암거설계 기술 등이 수자원, 지반, 구조분야의 공동 연구로 하

루빨리 정착되어 국민들의 삶의 질을 향상시키기를 기대한다.

참고문헌

- 건설교통부(2001), 댐설계기준
 한국건설기술연구원(2004), 하천제방 관련 선진기술 개발, 건설교통부.
 한국건설기술연구원(2005), 하천제방 배수통문의 설계 및 안정성 평가기법 연구, 건설교통부.
 한국수자원학회(2002), 하천설계기준.
 한국수자원학회(2005), 하천설계기준.
 한국수자원학회(1999), 하천공사표준시방서
 日本 建設省(2000), 河川堤防設計指針.
 國土開發 技術研究 Center(1998), 柔構造 通門 設計의 入門. 